

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор - проректор по научной
работе МГТУ им. Н.Э. Баумана,

д.т.н., с.н.с.

Зимин В.Н.

2018 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Диссертация «Методика определения траекторий космического аппарата для экспедиции Земля-астероид-Земля с учетом выбора орбит пребывания у астероида и ее применение для экспедиции к астероиду Апофис» выполнена на кафедре динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов факультета «Специальное Машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана Министерства образования и науки РФ.

В период подготовки диссертации соискатель Лан Аньци являлась аспиранткой очной формы обучения кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов факультета «Специальное Машиностроение» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

В 2013 г. окончила Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по специальности «Динамика полета и управление движением летательных аппаратов».

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2018 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, Ивашкин Вячеслав Васильевич, Федеральное государственное учреждение Федеральный исследовательский центр (ФГУ ФИЦ) «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», отдел №5 «Механика космического полета и управление движением», сектор №1 «Математическое

моделирование космических систем и процессов», главный научный сотрудник, по совместительству - профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Тема диссертации утверждена на заседании Ученого Совета «Научно-Учебного Комплекса Специального Машиностроения» «21» апреля 2014 г., протокол № 7.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы диссертации. В настоящее время весьма актуальна организация экспедиции полета космического аппарата (КА) к астероиду для решения фундаментальных задач исследования Солнечной системы и уменьшения астероидной опасности. Диссертационная работа Лан Аньци посвящена актуальной научной задаче: баллистическому проектированию миссии КА к астероиду (с последующим возвратом к Земле) для изучения его характеристик, взятия образцов его грунта, выведения мини-зонда с радиомаяком на долговременную орбиту спутника астероида.

В работах по анализу экспедиций к астероидам, также в конкретных проектах для сбора образцов материалов малых небесных тел и доставку их на Землю - “*Stardust*” (NASA), “*Hayabusa*” (Япония), “*Hayabusa-2*” (Япония), “*OSIRIS-REx*” (NASA), обычно используются двигательные установки малой тяги (ДУМТ). Применение ДУМТ уменьшает расход топлива, но, как правило, требует более сложных операций и длительного времени экспедиции. Для российской космонавтики в настоящее время более реально использование обычных химических двигательных установок большой тяги (ДУБТ). Однако эти ДУ приводят к большому расходу топлива, что делает особенно актуальной оптимизацию межпланетных траекторий экспедиции.

Кроме того, для реализации таких миссий обычно используется схема полета с выходом КА на орбиты искусственного спутника астероида (ИСА). Это делает необходимым исследование орбитальной динамики ИСА с целью предварительного выбора наиболее удобных орбит около астероидов для выполнения научных задач и обеспечения оптимального времени ожидания. С этим связана трудная задача обеспечения необходимого времени движения КА у астероида – «времени жизни». К тому же, необходимость высокоточного знания орбиты опасного астероида выявила актуальность задачи создания стабильных орбит спутника астероида со временем жизни спутника до нескольких лет. Реализация таких орбит спутника позволила бы уточнить параметры орбиты опасного астероида и сделать более обоснованные выводы о возможности его столкновения с Землей.

Поставлена в данной диссертационной работе актуальная задача анализа экспедиций с помощью ДУБТ с максимизацией полезной массы КА, что более точно, чем обычная минимизация характеристической скорости, отражает энергетическую эффективность траектории и существенно приближает исследование к требованиям реального проекта. Также включено в работу исследование орбитального движения спутника астероида с учетом

всех важных возмущений - от небесных тел, несферичности астероида, давления Солнечного света (ДСС) - для обеспечения оптимального времени возвращения к Земле и стабильной в течение нескольких лет орбиты мини-зонда. Построение энергетически оптимальных траекторий для экспедиций Земля-астероид-Земля, с учетом выбора орбит пребывания КА у астероида, еще недостаточно изучено и поэтому является **актуальной научно-технической задачей**.

Научная новизна работы представлена следующими положениями:

1. Разработана методика построения оптимальных, по максимуму полезной массы КА, траекторий экспедиции Земля-астероид-Земля с помощью ДУБТ. Разработаны алгоритмы построения сопряженных функций для этих траекторий, в случае максимизации полезной массы КА.

2. Получены и проанализированы оптимальные траектории полета КА к астероиду Апофис с возвращением к Земле. Показана принципиальная возможность осуществления космической экспедиции Земля-Апофис-Земля при использовании существующих ДУБТ на основе ракет типа «Союз», «Зенит» и разгонного блока «Фрегат» при полете в 2019-2022 гг.

3. Разработана математическая модель орбитального движения КА вокруг астероида с учетом важнейших возмущающих факторов, а именно - притяжения нескольких небесных тел (Солнца, Земли, Луны, Венеры, Юпитера и др.), несферичности астероида, как удлиненного эллипсоида вращения, ДСС и с учетом возможного затенения КА несферичным астероидом.

4. Проанализировано влияние возмущающих факторов (по отдельности и совместно) на характеристики пассивного орбитального движения КА вокруг Апофиса, в частности на «время жизни» КА на орбите спутника астероида Апофис. Выявлен «оптимальный выбор» параметров начальной орбиты спутника астероида, при котором «время жизни» КА около Апофиса будет большим. В частности, показана возможность создания стабильных орбит спутника астероида Апофис со временем жизни несколько лет вплоть до тесного сближения с Землей в 2029 г.

Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты позволяют:

1. Проводить проектирование и исследование траекторий полета КА для экспедиции Земля - Апофис - Земля.

2. Выбрать орбиты для долговременного движения искусственного спутника в окрестности астероида Апофис.

3. Применить полученные методики к исследованию других околоземных астероидов при учете их характеристик.

Достоверность полученных научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертации, обеспечивается адекватностью полученных моделей и методик решения существующим данным, проверкой разными методами, а также соответствием полученных расчетно-теоретических результатов исследованиям других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в том, что:

– автором описана математическая модель, разработана методика для

решения поставленных задач;

– автором лично разработаны программы для построения энергетически оптимальных траекторий экспедиции Земля-астероид-Земля с помощью ДУБТ, и для анализа орбитального движения спутника астероида, проведены расчеты с помощью разработанных программ, проанализированы полученные результаты;

– автор непосредственно участвовала в поиске, сборе, обработке необходимой информации, а также в апробации результатов исследования, в подготовке публикаций и докладов по теме работы.

Ценность научных работ соискателя. Полученные в диссертационной работе научные результаты, доложенные на конференциях и опубликованные в научных изданиях, могут использоваться в теоретических и практических исследованиях и проектировании экспедиции к астероидам. Полученные результаты рекомендованы также для использования в учебном процессе на кафедре динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов факультета «Специальное Машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на: 65 и 68 Международных конгрессах астронавтики (Пекин, 2013 г.; Гвадалахара, 2016 г.); XXXIX и XLI Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2015 г., 2017 г.); Международных конференциях «Околоземная астрономия» (Терскол, 2015 г.; Агой, 2017 г.); IX Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 2016 г.); Семинарах «Механика космического полета» им. В. А. Егорова, МГУ (Москва, 2017г.).

Основные публикации. Материалы диссертационной работы полно изложены в 19 опубликованных научных работах, все - по теме диссертации, в том числе в 10 статьях в изданиях, включенных в перечень рекомендованных ВАК РФ, общим объемом 4.7 п. л.

Основные публикации по теме диссертации

1. Ивашкин В.В., Лан А. Анализ орбитального движения спутника астероида Апофис // Космические исследования. 2017. Т. 55, № 4. С. 268-277. (0,625 п.л. / 0,3 п.л.).

Автором выполнен численный анализ движения спутника сближающегося с Землей астероида Апофис при учете возмущений от нескольких небесных тел, несферичности астероида для модели удлиненного эллипсоида вращения и давления солнечного света. Выявлены оптимальные параметры начальной орбиты, при которых «время жизни» основного КА и мини-спутника с радиомаяком около Апофиса будет достаточно большим.

2. Ивашкин В.В., Лан А. Анализ орбитального движения космического аппарата вокруг астероида Апофис // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468, № 4. С.403-407. (0,3 п.л. / 0,15 п.л.).

3. Anqi Lang, V.V. Ivashkin. Dynamics of Spacecraft Orbital Motion around

Asteroid Apophis // International Astronautical Congress IAC-2016. Proceedings. 2016. Paper IAC-16-C1,6,2,x33922, 12 p. (0,75 п.л. / 0,5 п.л.).

4. Лан Аньци, Ивашкин В. В. Исследование характеристик траекторий космического аппарата для экспедиции Земля–Апофис–Земля // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2017. №4 . Вып. 2. С. 93–101. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.).

5. Лан Аньци. Анализ космических траекторий для экспедиции Земля–Апофис–Земля и движения космического аппарата вокруг астероида Апофис. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017. № 7(67). С. 1-19. (1,25 п.л.).

Автором определены и исследованы траектории полета космического аппарата (КА) от Земли к астероиду Апофис, пребывания КА и специального мини-аппарата около него в течение некоторого времени и возвращения к Земле. Вычислены энергетически оптимальные траектории для этой экспедиции при полете с общей продолжительностью до двух лет в 2019–2022 гг. Проанализирована задача движения аппарата вокруг астероида Апофис с учетом возмущений трех типов: притяжения нескольких дальних небесных тел, несферичности астероида и давления солнечного света. Рассмотрено пассивное движение около астероида двух аппаратов: основного КА, который после пребывания у Апофиса в течение недели-месяца возвращается к Земле, и специального мини-спутника с длительным пребыванием у астероида с целью уточнения его орбиты.

6. Ивашкин В.В., Лан А. Определение и анализ оптимальных космических траекторий для организации экспедиции Земля – Апофис – Земля с применением двигательных установок большой тяги // Космонавтика и ракетостроение. Вып. 5 (98). 2017. С. 63-71. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.).

Автором определены и исследованы траектории для экспедиции Земля-астероид Апофис-Земля с полетом космического аппарата (КА) от Земли к астероиду Апофис, с пребыванием КА у Апофиса и с возвратом КА к Земле. Определены оптимальные, по максимуму полезной массы, траектории КА для этой экспедиции с использованием двигательных установок большой тяги при полете в 2019-2022 гг. Показана принципиальная возможность осуществления космической экспедиции Земля-Апофис-Земля на основе ракет «Союз-ФГ», «Союз-2», «Зенит» и разгонного блока «Фрегат».

7. Ивашкин В.В., Лан А. Анализ оптимальности траекторий экспедиции Земля-астероид-Земля // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 113, 25 с. URL:<http://library.keldysh.ru/preprint/asp?id=2017-113> (1,5 п.л. / 0,5 п.л.).

Автором проанализированы полученные прямыми методами энергетически оптимальные импульсные траектории космического аппарата (КА) для перелета от Земли к астероиду и для возврата от астероида к Земле. Построены сопряженные функции вдоль гелиоцентрических траекторий КА с сообщением в номинале трех импульсов скорости в сферах действия Земли и астероида. Получены производные от функционала по граничным временам траектории. Рассмотрены численные примеры для экспедиции Земля-астероид Апофис-Земля.

Заключение

Диссертация «Методика определения траекторий космического аппарата для экспедиции Земля-астероид-Земля с учетом выбора орбит пребывания у астероида и ее применение для экспедиции к астероиду Апофис» Лан Аньци является самостоятельной, завершенной, научно-квалификационной работой, содержащей новое решение задачи баллистического проектирования миссии к астероиду с последующим возвратом к Земле для изучения этого астероида, забора образцов его грунта, выведения мини-КА с радиомаяком на стабильную орбиту спутника астероида, соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Методика определения траекторий космического аппарата для экспедиции Земля-астероид-Земля с учетом выбора орбит пребывания у астероида и ее применение для экспедиции к астероиду Апофис» Лан Аньци соответствует специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и рекомендуется к защите по этой специальности 01.02.01 на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в Федеральном государственном учреждении Федеральный исследовательский центр (ФГУ ФИЦ) «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН» Федерального агентства научных организаций (ФАНО).

Заключение принято на заседании кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Присутствовало на заседании 16 чел. Результаты голосования: «за» – 16 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел., протокол № 7 от «10» января 2018 г.

/Член-корреспондент РАН,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Динамики
и управления полетом ракет
и космических аппаратов
МГТУ им. Н.Э. Баумана



Соловьев В.А.